

# ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS ROTATORIAS

Por: Dr. EVELIO PALOMINO MARÍN



## TABLA DE CONTENIDO

*El sistema internacional de unidades. i*

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>EL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO</b>                              | <b>1</b>  |
|          | <i>Mantenimiento contra avería. 2</i>                                       |           |
|          | <i>Mantenimiento Preventivo. 2</i>  |           |
|          | <i>Mantenimiento Correctivo. 3</i>  |           |
|          | <i>Identificación de los problemas potenciales. 3</i>                       |           |
|          | <i>El Programa de Mantenimiento Predictivo. 3</i>                           |           |
|          | <i>Las Tecnologías Predictivas. 5</i>                                       |           |
| <b>2</b> | <b>INTRODUCCIÓN A LAS VIBRACIONES EN MÁQUINAS ROTATORIAS</b>                | <b>9</b>  |
|          | <i>El Programa de Mantenimiento Predictivo. 9</i>                           |           |
|          | <i>Vibraciones en máquinas rotatorias. 12</i>                               |           |
|          | <i>Relación fuerzas vibraciones. 12</i>                                     |           |
|          | <i>Caracterización de las vibraciones en maquinarias. 16</i>                |           |
|          | <i>Vibración armónica. 17</i>   |           |
|          | <i>Vibración periódica. 18</i>  |           |
|          | <i>Vibración aleatoria. 18</i>  |           |
|          | <i>Sistema máquina – soportes. 19</i>                                       |           |
|          | <i>Sistema máquina – soportes ante la acción de una fuerza armónica. 21</i> |           |
|          | <i>Origen de las frecuencias de las vibraciones en maquinarias. 23</i>      |           |
|          | <i>Frecuencias generadas. 23</i>  |           |
|          | <i>Frecuencias excitadas. 24</i>  |           |
|          | <i>Influencia de las vibraciones externas. 25</i>                           |           |
|          | <i>Transmisión de vibraciones desde la máquina hacia sus soportes. 28</i>   |           |
|          | <i>Frecuencias producidas por fenómenos electrónicos. 28</i>                |           |
| <b>3</b> | <b>MEDICIÓN DE VIBRACIONES EN LA MAQUINARIA INDUSTRIAL</b>                  | <b>29</b> |
|          | <i>Descripción de los niveles de vibraciones. 30</i>                        |           |
|          | <i>Dominios del tiempo y de la frecuencia. 31</i>                           |           |
|          | <i>Análisis en el dominio del tiempo. 34</i>                                |           |

|   |    |
|---|----|
| <i>Análisis en el dominio de la frecuencia.</i>         | 36 |
| <i>Unidades de medición.</i>                            | 36 |
| <i>Elementos funcionales en un sistema de medición.</i> | 37 |
| <i>Transductores de desplazamiento.</i>                 | 38 |
| <i>Transductores sísmicos.</i>                          | 40 |
| <i>El acelerómetro piezoeléctrico.</i>                  | 42 |
| <i>Ubicación del acelerómetro piezoeléctrico.</i>       | 43 |
| <i>Fijación del acelerómetro piezoeléctrico.</i>        | 43 |
| <i>El preamplificador integrador.</i>                   | 44 |
| <i>Filtros.</i>   | 45 |
| <i>Ancho de banda constante.</i>                        | 47 |
| <i>Ancho de banda proporcional.</i>                     | 47 |
| <i>Analizadores de vibraciones.</i>                     | 49 |
| <i>Modos de operación análogo y digital.</i>            | 50 |
| <i>Instrumentos virtuales.</i>                          | 50 |
| <i>Calibración de espectros.</i>                        | 52 |
| <i>Medición de fase.</i>                                | 53 |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>4</b> | <b>ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO</b> | <b>59</b> |
|----------|---|-----------|

|   |    |
|---|----|
| <i>Conceptos básicos.</i>                               | 60 |
| <i>Frecuencia única.</i>                                | 61 |
| <i>Frecuencia única con armónicas.</i>                  | 65 |
| <i>Recortado de la señal.</i>                           | 75 |
| <i>Frecuencias naturales.</i>                           | 76 |
| <i>Frecuencias múltiples en sistemas lineales.</i>      | 76 |
| <i>Frecuencias múltiples en sistemas no - lineales.</i> | 77 |
| <i>Frecuencias aditivas y substractivas.</i>            | 81 |
| <i>Pulsos.</i>  | 85 |
| <i>Modulación en frecuencia.</i>                        | 86 |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>5</b> | <b>ELEMENTOS DE ANÁLISIS DIGITAL DE SEÑALES VIBROACÚSTICAS</b> | <b>89</b> |
|----------|--|-----------|

|  |     |
|--|-----|
| <i>La Transformada Rápida de Fourier (FFT).</i>                      | 89  |
| <i>Número de líneas del espectro.</i>                                | 91  |
| <i>La frecuencia de Nyquist y el ALIASING.</i>                       | 92  |
| <i>Limitaciones en el uso de la FFT.</i>                             | 95  |
| <i>Particularidades en el empleo de las ventanas de ponderación.</i> | 97  |
| <i>Errores estadísticos durante el análisis espectral.</i>           | 98  |
| <i>El promediado en el análisis espectral.</i>                       | 99  |
| <i>Uso del OVERLAP.</i>  | 100 |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>6</b> | <b>CAUSAS MÁS FRECUENTES DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS ROTATORIAS</b> | <b>105</b> |
|----------|--|------------|

|   |     |
|---|-----|
| <i>Empleo de las normas de severidad.</i> | 107 |
| <i>Frecuencias generadas.</i>             | 111 |
| <i>El desbalance de masa.</i>             | 112 |
| <i>Desbalance estático.</i>               | 112 |
| <i>Desbalance par.</i>                    | 113 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Desbalance casi – estático.</i>   | 113 |
| <i>Desbalance dinámico.</i>  | 113 |
| <i>Modelos para el balanceo.</i>   | 114 |
| <i>Unidades para expresar el desbalance.</i>                                 | 115 |
| <i>Amplitud y fase de las vibraciones debido al desbalance.</i>              | 116 |
| <i>Balanceo en un plano.</i>   | 117 |
| <i>Efecto cruzado.</i>   | 120 |
| <i>Balanceo en dos planos.</i>   | 120 |
| <i>Un ejemplo.</i>   | 125 |
| <i>Tolerancias para el balanceo in situ.</i>                                 | 126 |
| <i>Grado de calidad del balanceo según ISO.</i>                              | 126 |
| <i>Deformación permanente por flexión.</i>                                   | 128 |
| <i>Desalineamiento.</i>  | 128 |
| <i>Amplitud y fase debido al desalineamiento.</i>                            | 131 |
| <i>Pata coja.</i>  | 132 |
| <i>Soltura mecánica.</i>   | 132 |
| <i>Inestabilidad subsincrónica.</i>  | 135 |
| <i>Resonancia.</i>   | 136 |
| <i>Empleo de la fase en la identificación del fenómeno de la resonancia.</i> | 137 |
| <i>Determinación experimental de la frecuencia de resonancia.</i>            | 138 |
| <i>Fuerzas hidrodinámicas y aerodinámicas.</i>                               | 139 |
| <i>Transmisiones por polea – correas.</i>                                    | 141 |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>7</b> | <b>VIBRACIONES EN MOTORES DE INDUCCIÓN</b> | <b>143</b> |
|----------|--|------------|

|  |     |
|--|-----|
| <i>Frecuencias de diagnóstico.</i>                 | 143 |
| <i>Excentricidad en el estator.</i>                | 144 |
| <i>Excentricidad en el rotor.</i>                  | 145 |
| <i>Rotura de barras en el rotor.</i>               | 146 |
| <i>Corto circuito en el enrollado del estator.</i> | 146 |
| <i>Deformaciones térmicas.</i>                     | 147 |
| <i>Pulsos torsionales.</i>                         | 147 |
| <i>Un comentario práctico.</i>                     | 148 |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>8</b> | <b>VIBRACIONES EN PARES ENGRANADOS</b> | <b>149</b> |
|----------|--|------------|

|   |     |
|---|-----|
| <i>Análisis FFT vs. Transmisiones por engranajes.</i> | 150 |
| <i>Fallos en engranajes. Causas.</i>                  | 151 |
| <i>La función CEPSTRUM.</i>                           | 153 |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>9</b> | <b>VIBRACIONES EN COJINETES DE RODAMIENTOS</b> | <b>155</b> |
|----------|--|------------|

|   |     |
|---|-----|
| <i>Medición de vibraciones en rodamientos.</i>                                | 155 |
| <i>Magnitud a medir.</i>  | 157 |
| <i>Frecuencias generadas por los rodamientos.</i>                             | 157 |
| <i>Detección de defectos en rodamientos.</i>                                  | 159 |
| <i>Tecnologías para la detección de defectos en cojinetes de rodamientos.</i> | 163 |
| <i>Causas de fallos en rodamientos.</i>                                       | 166 |

---

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>10</b> | <b>FUNDAMENTOS DE LA DINÁMICA DE ROTORES</b>          | <b>171</b> |
|           | <i>Medición de vibraciones en el rotor. 171</i>       |            |
|           | <i>El ploteo orbital. 173</i>                         |            |
|           | <i>Posición de la línea de centros del rotor. 176</i> |            |
|           | <i>Cascada de espectros. 179</i>                      |            |
|           | <i>Ploteo de BODE. 179</i>                            |            |
|           | <i>Ploteo polar. 181</i>                              |            |
|           | <i>Un caso de estudio. 181</i>                        |            |
|           | <hr/>   |            |
|           | <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                                   | <b>191</b> |
|           | <hr/>   |            |
|           | <b>GLOSARIO DE TÉRMINOS</b>                           | <b>195</b> |



**EVELIO PALOMINO MARÍN**, La Habana, Cuba 1957. Ingeniero Mecánico 1981, Universidad Politécnica de la Habana *José A. Echeverría* (CUJAE), Centro Rector de la enseñanza de la Ingeniería y la Arquitectura en Cuba. Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, CUJAE, Cuba. Profesor de Vibraciones, Ruido y Diagnóstico, CUJAE, Cuba. Adiestrado en el Instituto de Vibroacústica Aplicada, Politécnica de Póznan, Polonia 1988-89 y en el Instituto de Investigaciones de la Construcción de Maquinarias, Academia de Ciencias, Moscú 1990-91. Más de veinte años de experiencia

profesional participando en la solución de problemas de investigación y desarrollo en las ramas del Azúcar, el Petróleo, la Generación Eléctrica, la Pesca, el Cemento, la Salud, el Turismo, la Sideromecánica, las Fuerzas Armadas y el Níquel entre otras, incluyendo la formación de personal técnico especializado y la docencia en la Educación Superior. Profesor Invitado, Universidad Nacional Experimental Politécnica *Antonio José de Sucre*, Puerto Ordaz, Venezuela 1993-94, Universidad de los Andes (*UNIANDÉS*), Santa Fe de Bogotá, Colombia 1998, Universidad Técnica de *Oruro*, Universidad Mayor de *San Andrés* y Universidad Mayor de *San Simón*, Bolivia 2000-2003. Premio Anual de la Comisión Nacional de Grados Científicos por Mejor Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas. Tres veces Distinción Especial del Ministro de Educación Superior de la República de Cuba por Trabajo Distinguido en la Enseñanza de Postgrado y las Investigaciones Científicas. Premio Anual de la Academia de Ciencias de Cuba por sus aportes científicos en el campo de las Vibraciones y el Diagnóstico Mecánico. Premio Relevante en el XIV Forum Cubano de Ciencia y Técnica por sus aportes durante más de 25 años a la Industria Cubana. Jefe de la División de Ingeniería de las Vibraciones, Ruido y Diagnóstico del Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento, CEIM. Miembro del Tribunal Nacional y de la Comisión Nacional de Grado Científico. Presidente del Comité Técnico Cubano de Normalización en Vibraciones y Acústica de la República de Cuba. Consultor Técnico Especializado de *COMSET-BOLIVIA S.R.L.* Especialista reconocido por la Compañía Canadiense *DYNAMIC ENGINEERING LTD.* Especialista autorizado por la Compañía Danesa - Alemana *BRÜEL & KJÆR VIBRO.*